

УДК 666.3.041.55

*КУДЯКОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
kudyakov@tsuab.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

*АПКАРЬЯН АФАНАСИЙ СААКОВИЧ, канд. техн. наук,
asaktc@ispms.tsc.ru*

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021, г. Томск, пр. Академический, 8/2*

*Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

*КУЛЬКОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
kulkov@ms.tsc.ru*

*Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021, г. Томск, пр. Академический, 8/2*

*ХРИСТЮКОВ ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ, доцент,
tes@main.tusur.ru*

*Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СРЕДНЮЮ ПЛОТНОСТЬ ГРАНУЛИРОВАННОГО СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА*

Рассмотрена возможность управления технологическими процессами производства гранулированного стеклокристаллического материала на основе бытового и промышленного стеклобоя, легкоплавкой глины и древесных опилок. Разработана ресурсосберегающая технология получения теплоизоляционного гранулированного материала. При исследовании физико-технических характеристик гранул использовались методы математического моделирования эксперимента. Установлены и оптимизированы технологические факторы, влияющие на среднюю плотность гранулированного стеклокерамического материала.

Ключевые слова: стеклобой; древесные опилки; шихта; гранулы; средняя плотность; теплопроводность; температура; теплоизоляция; фактор варьирования; критерий оптимизации; матрица планирования; дисперсия; математическая модель; оптимизация состава и технологических параметров.

*ALEKSANDR I. KUDYAKOV, DSc, Professor,
kudyakov@tsuab.ru*

* Работа выполнялась в ООО «Томтехнология» в рамках Федерального контракта с государственным инновационным фондом содействия малому бизнесу № 2882р/5309 и в Томском государственном архитектурно-строительном университете (ТГАСУ) при финансовой поддержке в соответствии с комплексным проектом 02.G25.31.002 по Постановлению № 218 Минобрнауки России.

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia
AFANASY S. APKARYAN, PhD, A/ Professor,
asaktc@ispms.tsc.ru*

*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,
8/2, Akademicheskii Ave., 634021, Tomsk, Russia
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenin Str., 634050, Tomsk, Russia
SERGEY N. KULKOV, DSc, Professor,
kulkov@ms.tsc.ru*

*Tomsk State University,
36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,
8/2, Akademicheskii Ave., 634021, Tomsk, Russia
VLADIMIR G. CHISTYKOV A/Professor,
tec@main.tusur.ru*

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Str., 634050, Tomsk, Russia*

THE AVERAGE DENSITY OF GRANULAR GLASSCERAMICS DEPENDING ON TECHNOLOGY FACTORS

The paper describes the possibility of engineering process control in the production of granular glassceramics based on general purpose and industrial broken glass, low-melting clay and sawdust.

The paper presents the development of resource-efficient technology of heat insulating granular material. A study of physic-technical properties of granules is carried out by mathematical simulation methods. Technology factors that have an effect on the average density of granular glassceramics are obtained and optimized.

Keywords: broken glass, sawdust; mixture; granules; average density; thermal conductivity; temperature; heat insulation; optimization criterion; dispersion; mathematical model.

За последние десятилетия отечественные теплоизоляционные материалы не претерпели существенных изменений и по многим важным техническим и экономическим параметрам, а именно теплопроводности, механической прочности при сжатии, водопоглощению, температуре эксплуатации, стоимости и обеспечению ресурсо-и энергосбережения зданий уступают зарубежным аналогам. Решение проблемы разработки и внедрения современных наукоёмких технологий производства высокоэффективных теплоизоляцион-

ных материалов с использованием побочных продуктов промышленности является актуальным [1, 2, 3].

К эффективным теплоизоляционным материалам относится пористый стеклокерамический материал, полученный из природного глинистого сырья и отходов промышленности [4, 5, 6]. Основным преимуществом этого материала является уникальное сочетание теплоизоляционных и конструктивных свойств, а именно низкая теплопроводность, малая средняя плотность, высокая прочность и термостойкость.

Цель работы – установление влияния режимов технологических процессов на среднюю плотность гранулированного стеклокерамического материала.

Объект исследований – гранулированный стеклокерамический материал.

С целью формирования каркаса гранулы с высокими механическими свойствами необходимо матрицу сформировать из алюмосиликатных компонентов. В этом случае появляется возможность направленного управления процессом структурообразования стеклокерамического материала во время синтеза с целью получения желаемых новообразований и требуемых физико-технических характеристик конечной продукции. В состав шихты в качестве алюмосиликатных составляющих предлагается вводить легкоплавкую глину. Основное предназначение глины – повысить механическую прочность и огнеупорность с сохранением низкой теплопроводности и водопоглощения.

Отличительной особенностью предлагаемого состава шихты для производства стеклокерамического материала, в отличие от традиционных составов пеностекла, является ввод древесных опилок. Основное назначение древесных опилок в шихте пеностекла:

- увеличить температуру гранул и газов в период вспенивания;
- обеспечить равномерное температурное поле по сечению гранулы;
- увеличить объём газа в период газообразования;
- увеличить парциальное давление газа внутри гранулы.

Ранее установлено, что предельное содержание древесных опилок в шихте – 3 % по массе. При увеличении содержания древесных опилок затрудняется процесс гранулирования. Шихта становится рыхлой, что приводит к уменьшению механической прочности сырцовых гранул, появляются трудности при транспортировке и термической обработке гранул. Основная причина – наличие в древесных опилках пентозанов (в хвойных – 11–12 %, в лиственных – 23–29 %). Пентозаны в присутствии воды и щелочей гидролизуются, и образуются простые сахара, хорошо растворимые в воде. Сахара препятствуют хорошему сцеплению частиц шихты с древесными отходами. В композициях древесные опилки – глина – кокс – вода использовались хвойные породы.

Для предотвращения слипания гранул в процессе термической обработки и образования восстановительной среды в печи гранулы перед подачей в печь окатывают в слое тонкомолотых опилок (древесного порошка). Древесный порошок используется как разделительная среда для гранул.

При проведении исследований в лабораторных условиях применялся следующий состав шихты: стеклобой – 67–84 %, легкоплавкая глина –

8–25 %, древесные опилки – 3 %, кокс – 5 %. Термообработка гранул проводилась при температуре 850 °С, длительность вспенивания – 5–15 мин. Для снятия остаточных термических напряжений, способствующих образованию трещин, проводился отжиг гранул в процессе охлаждения печи.

Для проведения оптимизации состава шихты и режимов технологических процессов изготовления стеклокерамических гранул был выбран следующий состав шихты, обеспечивающий образование равномерных по размеру пор, однородную структуру и высокую прочность перегородок в обожженных гранулах: стеклобой – 82–84 %, глина – 8–10 %, древесные опилки – 3 % и кокс – 5 %.

Способ подготовки гранул: компоненты шихты дозировались, загружались в стержневую вибрационную мельницу 75Т-ДрМ и подвергались совместной механоактивации. Помол стеклобоя проводили до удельной поверхности 400 м²/кг. Полученная шихта затворялась водой. После достижения требуемой пластичности из шихтовой массы формовались гранулы размером 10 мм и окатывались в древесном порошке. Получаемые сферические гранулы имели относительно одинаковые геометрические размеры, форму, цвет и фактуру поверхности.

Для оптимизации состава и режима вспенивания проводилось планирование эксперимента с использованием системы Mathcad. В соответствии с поставленной задачей были выбраны факторы варьирования, интервал варьирования, а также верхние и нижние уровни факторов [7].

Критерием оптимизации (Y) была выбрана средняя плотность гранул, кг/м³, при 20 °С.

Факторы варьирования:

X_1 – длительность вспенивания (при температуре 850 °С), мин;

X_2 – содержание легкоплавкой глины, %;

X_3 – содержание древесного порошка, %.

Основной уровень, интервал варьирования, верхний и нижний уровень факторов указаны в табл. 1.

Таблица 1

Основной уровень и интервалы варьирования факторов

Фактор	X_1	X_2	X_3
Основной уровень	4	10	4
Интервал варьирования	2	5	1
Верхний уровень	6	15	5
Нижний уровень	2	5	3

В результате обработки экспериментальных данных по матрице планирования (табл. 2) получена математическая квадратичная модель второго порядка, выраженная уравнением

$$Y = 255,04 - 6,1X_1 + 9,42X_2 + 15,1X_3 - 8,25X_1X_3 - 8,5X_2X_3 - 10,5X_1X_2X_3 + 21,18X_2^2 + 13,4X_3^2. \quad (1)$$

Таблица 2

Матрица планирования [5]

	Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	$X_4 = X_1^2 - a$	$X_5 = X_2^2 - a$	$X_6 = X_3^2 - a$	Y_i
Точки плана ПФЭ 2^3 ($N_0 = 2^3$)	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	273,0
	2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	313,0
	3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	306,0
	4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	299,0
	5	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	280,0
	6	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	315,0
	7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	272,0
	8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	274,0
Звёздные точки	9	+1	+1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	221,0
	10	+1	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	276,0
	11	+1	0	+1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	310,0
	12	+1	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	250,0
	13	+1	0	0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	316,0
	14	+1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	221,0
Нулевая точка	15	+1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	277,0
$\sum X_{ij}^2$	15	10,952			8				4,3727				

Критерий Фишера для данного уравнения равен: $F = 1,795$ при табличном значении $f_p = 2,06$.

Так как соблюдается неравенство $f_p > F$, то уравнение адекватно описывает технологический процесс. Используя полученную математическую модель, выраженную уравнением по различным группирующим переменным факторам, строим 3М-график, характеризующий изменение свойств гранул (рис. 1).

Пространственные графики отображают поверхности, описываемые квадратичной функциональной зависимостью, с изменяющимися свойствами готового образца. Изменяя факторы $X_1 = 2-6$ мин, $X_2 = 5-15$ %, $X_3 = 3-5$ %, получили предельные значения средней плотности $228-1056$ кг/м³.

На рис. 1 изображён график, где функция отклика Y (средняя плотность) зависит от изменения X_1 (длительности вспенивания) и X_2 (содержания легкоплавкой глины в шихте). Содержание древесного порошка X_3 равно 4 %. Анализируя график, можно сделать вывод о том, что при содержании легкоплавкой глины 8 %, древесного порошка 4 % и длительности вспенивания 4 мин получена оптимальная средняя плотность гранул – 228 кг/м³.

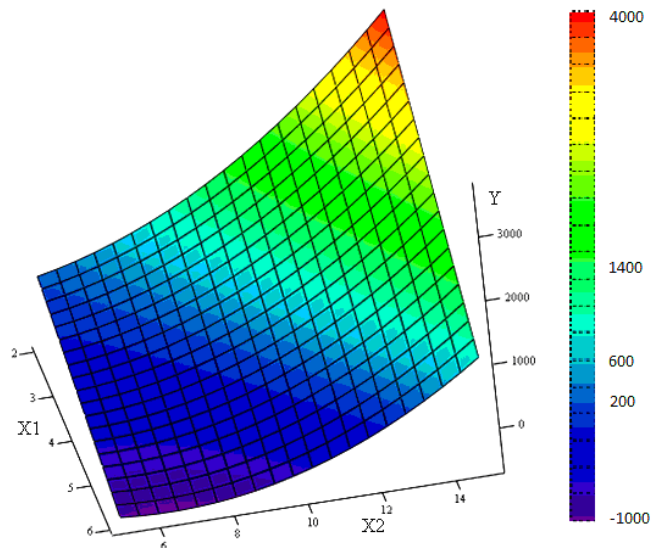


Рис. 1. Зависимость средней плотности гранул от длительности вспенивания и содержания легкоплавкой глины при содержании древесного порошка 4 %

Таким образом, применение полного факторного эксперимента и построение математической квадратичной модели второго порядка с математической обработкой результатов эксперимента позволяют наглядно представить изменение параметров качества стеклокерамического гранулированного материала и получить теплоизоляционный материал с заданными свойствами.

Эффекты взаимодействия составляют нелинейную часть уравнения (1). Смысл этого эффекта состоит в том, что действие фактора зависит от того, на каком уровне находится другой фактор. Изменяя независимые переменные пропорционально величинам коэффициентов регрессии, совершаем движение в направлении градиента функции отклика по самому короткому пути – к оптимуму. В результате получаем графики, изображённые на рис. 2.

Оптимальное содержание глины составляет 9,8 % при обеспечении средней плотности гранул 255 кг/м³. Полученный график даёт возможность определять среднюю плотность в широком диапазоне, выходящем за пределы интервалов варьирования.

Анализируя полученные зависимости и графики, можно сделать вывод о том, что при введении в состав шихты стеклобоя в количестве 84–82 % и легкоплавкой глины от 8,0 до 10,0 % при постоянном содержании древесных опилок 3 % и кокса 5 % обеспечивается получение средней плотности гранул теплоизоляционного стеклокристаллического материала 228–255 кг/м³. Оптимальная длительность вспенивания гранул при этих значениях составляет 5 мин.

Вывод

Применение полного факторного эксперимента и построение математической квадратичной модели второго порядка с обработкой результатов эксперимента позволяет наглядно представить влияние технологических факторов на среднюю плотность стеклокерамических гранул и обосновать рациональный состав шихты при подготовке технологического регламента.

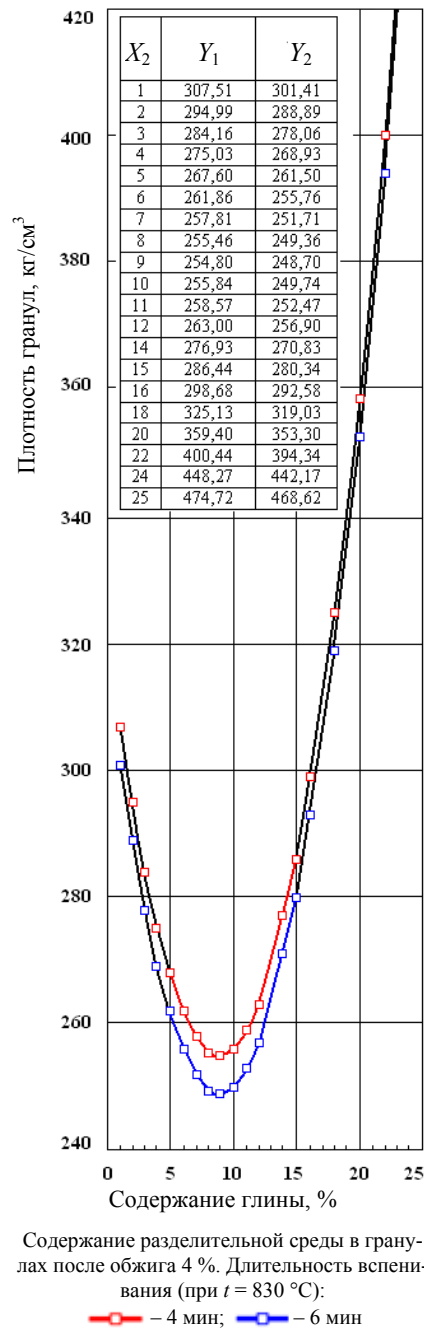


Рис. 2. Зависимость средней плотности гранул от содержания глины в шихте

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ketov, A.A.* An experience of reuse of glass cullet for production of foam structure material // Proceedings of International Symposium Recycling and Reuse of Glass Cullet. 19–20 March 2001, Dundee UK.
2. *Кудяков, А.И.* Гранулированный теплоизоляционный материал / А.И. Кудяков, А.С. Апкарян // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 4. – С. 210–217.
3. *Лотов, В.А.* Перспективные теплоизоляционные материалы с жёсткой конструкцией / В.А. Лотов // Строительные материалы. – 2004. – № 11. – С. 8–9.
4. *Пат. 2374191* Российская Федерация. Способ получения гранулированной пеностекло-керамики / А.С. Апкарян, А.С. Христюков. – Рег. 27. 11. 2009.
5. *Пат. 2540741* Российская Федерация. Способ изготовления изделий из гранулированной пеностеклокерамики / А.С. Апкарян, А.С. Христюков. Заявка 2013157669. Вход. № 089807. Приоритет изобретения 14.12.2013.
6. *Apkaryan, A.S.* Thermal insulation of pipelines by foamed glass-ceramic / A.S. Apkaryan, A.I. Kudyakov // IOP SCIENCE. Journals. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 71. (2015) 012004. doi:10.1088/issn.1757-899X. Online ISSN: 1757-899X. Print ISSN: 1757-8981. IOP Publishing Temple Circus, Temple Way. Bristol. BS1 6BE. UK. Doi: 10/1088/1757-899X/71/1/012004.
7. *Задгенидзе, И.Г.* Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Задгенидзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.

REFERENCES

1. *Ketov A.A.* An experience of reuse of glass cullet for production of foam structure material // Proceedings of International Symposium Recycling and Reuse of Glass Cullet. 19–20 March 2001, Dundee UK.
2. *Kudyakov A., Apkaryan A.* Granulirovanniy teploizolyatsionnyy material [Granulated insulation material]. *Vestnik TSUAB*, 2013. No. 4. Pp. 210–217. (rus)
3. *Lotov V.A.* Perspektivnyye teploizolyatsionnyye materialy s zhestkoi konstruksiei [Prospective insulation materials with a rigid structure]. *Construction Materials*, 1990. No. 11. Pp. 8–9. (rus)
4. *Apkarian A., Khristyukov V.* Sposob polucheniya granulirovannoi penosteklokeramiki [A method of producing glassceramics]. Pat. Rus. Fed. N 2374191. 2009.
5. *Apkarian A., Khristyukov V.* Sposob izgotovleniya izdelii iz granulirovannoi penosteklokeramiki [A method of producing glassceramics products]. Pat. Rus. Fed. N 2540741. 2013.
6. *Apkaryan A.S., Kudyakov A.I.* Thermal insulation of pipelines by foamed glass-ceramic. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015. No. 71.
7. *Zadgenidze I.G.* Planirovanie eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh sistem [Experimental study of multicomponent systems]. Moscow : Nauka Publ., 1976. 390 p. (rus)